



KANDIDAATINTYÖ

Tapani Autioniemi

**ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA
2020**



KANDIDAATINTYÖ

Liikeanturit sisätilanavigoinnin apuna

Tapani Autioniemi

Ohjaaja: Risto Vuohtoniemi

**ELEKTRONIIKAN JA TIETOLIIKENNETEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA
2020**

Autioniemi T. (2020) Liikeanturit sisätilanavigoinnin apuna. Oulun yliopisto, Elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 31 s

TIIVISTELMÄ

Tässä työssä tutkitaan MEMS -liikeantureiden (kiihtyvyysanturi, gyroskooppianturi, magnetometrianturi) avulla toteutettujen järjestelmien soveltuvuutta kuljetun reitin seurantaan. Nykyaikaiset ja suosituimmat reitinseurantaan käytettävät järjestelmät pohjautuvat satelliittinavigointijärjestelmiin. Satelliittipohjaiset järjestelmät toimivat pääsääntöisesti kaikkialla maapallolla ja niiden hinta käyttäjälle on verraten alhainen. Ongelmaksi tulevat usein paikat, joissa satelliittien lähettämät signaalit jäävät vastaanotossa liian heikkolaatuiselle tasolle. Tällöin jokin muu teknologia, kuten MEMS -liikeanturit, voivat korvata satelliittinavigoinnin. Tässä työssä käytettiin MEMS -anturijärjestelmää, mikä oli toteutettu pienikokoisena tiedonkeruujärjestelmänä. Järjestelmässä oli useita eri tyyppisiä MEMS -sensoreita. Lisäksi tässä työssä on esitetty katsaus MEMS -teknologiaan ja katsaus satelliittinavigointijärjestelmiin. Tuloksena voitiin huomata, että MEMS -liikeantureiden tuottama korvaavuus reitin seurantaan ei ole yhtä laadukas, kuin yleensä satelliitteihin pohjautuvien järjestelmien reitin seuranta on. Myös satelliittinavigoinnin tulos sisältää epätarkkuutta. Kyse on enemmän hyväksyttävästä virheestä MEMS -liikeantureiden kanssa.

Avainsanat: MEMS, liikkeen tunnistus, reitin seuranta, GNSS, satelliittinavigointi.

Autioniemi T. (2020) Inertial Sensors Aiding Indoor Navigation. University of Oulu, Degree Programme in Electronics and Communications Engineering, Bachelor's Thesis, 31 p.

ABSTRACT

This thesis studies capabilities of systems based on MEMS -inertial sensors (accelerometer, gyroscope, magnetometer) for following route of travel. Modern and most popular way of following the travelled route are based on satellite navigation. Satellite navigation systems operate typically all over the world and the cost for user is rather low. Problems raise with places, where received satellite signals are at too weak level for a receiver. Then some other technology, like MEMS inertial sensors can take place over the satellite navigation. In this thesis an evaluation kit of MEMS -sensors is used. Evaluation kit is realized as data acquisition system. System contains several different MEMS -sensors. This thesis inhereents also an overview of MEMS inertial sensors and an overview of satellite navigation systems. Results reveal, that quality of route following by MEMS sensors is not as good quality, as satellite navigation systems are understood to provide. Also, satellite navigation systems contain uncertainty. More it is a question of acceptable error with MEMS inertial sensors.

Key words: MEMS, movement detection, route following, GNSS, satellite navigation.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS.....	5
ALKUSANAT	6
1. JOHDANTO	7
2. GNSS -SATELLIITTIJÄRJESTELMÄT	9
2.1 Maailmanlaajuiset satelliittijärjestelmät	12
2.2 Alueelliset GNSS -järjestelmät	14
2.3 Yhteenveto satelliittinavigointijärjestelmistä	15
3. MEMS TEKNOLOGIA JA ERI SENSORIT.....	16
3.1 MEMS toteutuksen periaatteita	16
3.2 Sensoritoteutuksia.....	17
4. LIIKEANTURIT PAIKANMÄÄRITYKSESSÄ.....	20
5. KOKEIDEN SUUNNITTELU	23
6. MITTAUKSET	24
6.1 Mittausjärjestely ja asetukset.....	24
6.2 Mittaustulokset	24
7. TULOSTEN KÄSITTELY JA VIRHEEN ARVIOIMINEN.....	26
8. YHTEENVETO	29
9. LÄHTEET	30

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Polar Electro Oy:llä ja sen tarkoituksena on ollut tutustua ST Microelectronics SensorTile.box -laitteeseen ja sen ominaisuuksiin. Laite soveltuu muun muassa MEMS -sensoreiden ominaisuuksien tutkimiseen ja sensoreiden tuottaman mittaustiedon keruuseen. Työ jakautuu GNSS -järjestelmien katsaukseen, liikeantureiden katsaukseen, tehtyyn kokeeseen ja tuloksen arviointiin.

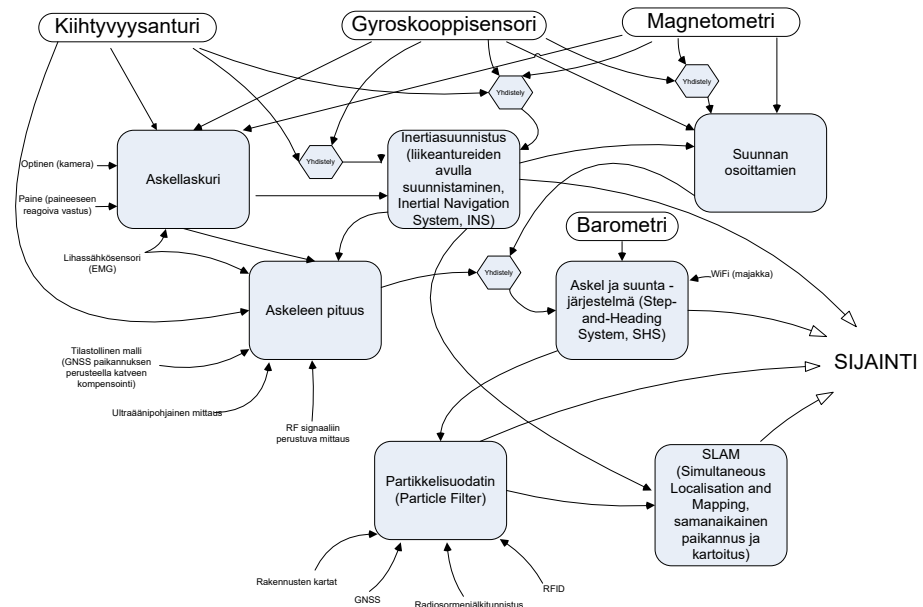
Haluan kiittää erityisesti Marko Tuhkalaa työni kommentoinnista.

Oulussa, 27.4.2020 Tapani Autioniemi

1. JOHDANTO

GNSS (Global Navigation Satellite System) -satelliittinavigointijärjestelmät, kuten GPS (Global Positioning System), GLONASS, BeiDou ja Galileo ovat tuoneet helpon tavan jokamiehen paikannukseen ja kuljetun reitin seurantaan. Näillä järjestelmillä on kuitenkin rajoituksensa. Yleensä ne vaativat jokseenkin hyvän ja suoran näköyhteyden satelliittiin. Pilvet eivät vielä tuota estettä satelliittinavigointijärjestelmille. Kiinteät esteet, kuten puiden oksat ja lehdet, katot ja pinnat vastaanottimen antennin yläpuolella aiheuttavat jo epätarkkuutta paikanmäärittäykseen. Kaupunkien kapeat kadut ja korkeat talojen seinät rajaavat horisonttinäkymää tehokkaasti. Sisätiloissa ei tavallisesti ole lainkaan suoraa yhteyttä taivaalle satelliitteihin. Sisätiloissa GNSS -järjestelmillä paikantaminen käy yleensä varsin epävarmaksi tai mahdottomaksi.

Jos riittävän hyvälaatuinen yhteys navigointisatelliitteihin menetetään, paikantamiseen täytyy ottaa käyttöön muita keinoja. Liikeantureiden osuutta on tutkittu pitkään, mutta myös monia muita lähestymistapoja löytyy ja niitä on kokeellisesti tutkittu. Vaihtoehtona on helposti erilaisille radiolähettimille perustuvia järjestelmiä. Sisätiloihin on mahdollista rakentaa oma radiolähettimien verkosto majakkaperiaatteella. Esimerkiksi langattomien lähiverkkojen tukiasemia tai Bluetooth -lähettimiä voidaan hyödyntää sisätilapaikannukseen. Lähettimien sijainti täytyy olla hyvin tunnettu. Tutkaperiaatteella toimivia laitteita voidaan käyttää satelliittinavigoinnin korvaamisessa. Tällöin ympäristöä ja sen luonnollisia esteitä täytyy skannata. On myös tunnettava ympäristöä valmiiksi, jotta tiedetään missä liikutaan. Kun ympäristö on skannattu, voidaan päätellä kuljettua reittiä. [1]



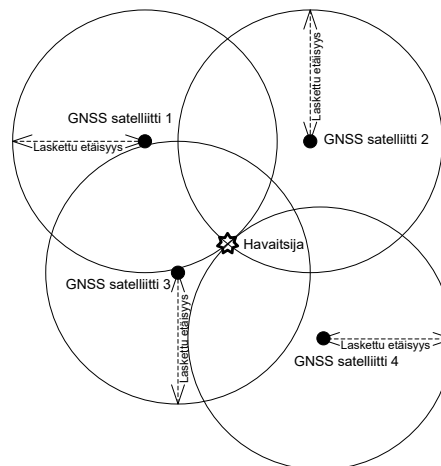
Lähde: Robert Harle: A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrian, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol 15, No. 3, 3rd Quarter 2013.

Kuva 1. Kaavio erilaisista GNSS -järjestelmien katveiden aikaisten kompensaatiomenetelmien konfiguraatioista. [1]

Liikeanturit, toisin ilmaistuna myös liikesensorit, tarjoavat houkuttelevan tavan seurata ihmisen liikkumista ja samalla myös kulkureittiä. Liikeantureiden mittaustiedoista voidaan päätellä liikkeelläolon piirteitä, kuten nopeutta ja kulkusuuntaa. Eri tyyppisiä antureiden mittaustietoja voidaan lisäksi yhdistellä matemaattisilla menetelmillä (kuva 1). Näistä voidaan päätellä myös sijainnin muuttumista. Liikeantureita hyödynnettäessä ei tarvita erikseen ennalta tunnettua tietoa ympäristöstä. Liikeantureita varten tarvitaan lähtöpisteen tai satelliittinavigaation katveen alkupisteen sijainti. Kun luotettava paikanmääritys tiedetään, voidaan paikanmääritykseen ja reitinlaskentaan tunnetusta kohdasta ajallisesti eteenpäin käyttää apuna esimerkiksi kiihtyvyysanturia, gyroskoopianturia, magnetometriä ja myös barometriä. Näin eri sensoritietojen perusteella voidaan aloittaa approksimoimaan sijainnin muuttumista viimeisestä tunnetusta ja luotettavasta satelliittipaikannusjärjestelmän antamasta sijainnista. Sijainnin määrittäminen liikeanturitiedon perusteella laskettuna epätarkentuu ajan ja liikkeen myötä nopeasti. Kuitenkin liikesensoreiden avulla laskettu paikkatieto saattaa olla jo riittävän hyvälaatuinen arkipäiväiseen käyttöön. Tässä tutkielmassa käsitellään MEMS -liikesensoreiden hyödyntämistä reitin ja liikkeen seurantaan. [1, 2]

2. GNSS -SATELLIITIJÄRJESTELMÄT

GNSS (Global Navigation Satellite System) -satelliittijärjestelmiä kehitettiin alunperin sotilaskäyttöön. Paikannus koettiin tärkeäksi ja satelliitteihin pohjautuva paikannusjärjestelmä rakennettiin Yhdysvalloissa 1960 -luvulla. Tuolloin Transit -satelliittinavigointijärjestelmä (tunnettiin myös nimellä Navy Navigation Satellite System) rakennettiin alun perin Polaris-sukellusveneiden jokasään paikannusjärjestelmäksi. GNSS-järjestelmien rakenteesta johtuen ne toimivat pääsääntöisesti joka puolella maapalloa. Siviilikäyttöön nämä järjestelmät alkoivat tulla 1967 -vuodesta alkaen, kun Yhdysvaltain hallinto avasi silloisen Transit -järjestelmän siviilikäyttöön. GNSS-järjestelmien tarkkuus ja palvelun tarjolla olo paranivat selvästi, kun sijainnin määrittystapa muuttui vuonna 1995 valmistuneessa GPS -järjestelmässä. Myöhemmin ilmestyi vielä useita samankaltaisia järjestelmiä. Myös paikannusjärjestelmien hinta käyttäjätasolla on halventunut ja satelliittipaikannus onkin mukana miltei joka ainoassa nykyaikaisessa matkapuhelimessa. Tämän kehityksen johdosta järjestelmien käyttö on laajentunut huomattavasti. Samoin on hyvin laaja kirjo erilaisia kannettavia laitteita, joiden ominaisuuksiin kuuluu satelliittipaikannus. [3,4]



Kuva 2. Minimimäärä satelliitteja yksikäsitteisen paikan määrittämiseen [3].

Paikanmäärittäminen nykyaikaisissa GNSS-järjestelmissä perustuu satelliittien lähettämien signaalien kuluaikojen mittaamiseen ja tästä laskettujen etäisyyksien tulkintaan. Tämä vaatii erittäin tarkan kellon mukanaolon. Satelliittien kellot tuotetaan atomikelloista, joiden virhettä korjataan jo osittain valmiiksi ennen kanta-aallon lähettämistä. Aika saadaan GPS -järjestelmästä 10 ns tarkkuudella. Lisäksi järjestelmien maa-asemilla on vielä tarkempia kelloja tukemassa järjestelmän ajastusta. Satelliitit ovat tyypillisesti MEO (Medium Earth Orbit, keskikorkea rata) -radoilla. Tämä tarkoittaa, että satelliitin rata kiertää noin 22000 km korkeudella maanpinnan yläpuolella. Noin puolen vuorokauden kiertoaajan radoilla olevien satelliittien rataliikkeiden ennalta laskeminen on helpompaa, kun satelliitti on näkyvissä varsin pitkään vastaanottimelle. Tällöin myös sijainnin määrittäminen helpottuu. Saman satelliitin- tai satelliittiryhmän avulla voi sijaintia määrittää myös pidemmän ajanjakson. Satelliitit on järjestetty kiertoradoilleen siten, että vastaanottimen näkemä

satelliittikuvio toistuu samanlaisena kullekin GNSS -satelliittijärjestelmälle ominaisin aikavälein. [3]

Kunkin satelliitin etäisyyden ja sijainnin määrittämisessä suhteessa havaitsijaan tuo ratkaisuksi pallopinnan satelliitin ympärille. Sijainti on jossakin tuon pallopinnan kohdassa satelliitista ja pallopinnan säde (etäisyys satelliitista) tunnetaan. Kolmen satelliitin sijainnin tieto antaisi vastaanottimen sijainnin ratkaisuksi kolmen eri pallopinnan leikkauspisteet. Näin saadaan lasketuksi kaksi eri pistettä sijainnille, mutta neljäs satelliitti tuo yksikäsitteisen ratkaisun sijaintiin (kuva 2). Neljän satelliitin tilanteessa yhtä satelliittia käytetään aikalaskennan perustana. Mitä enemmän satelliitteja saadaan mukaan sijainnin määrittelyyn, sitä tarkemmaksi sijainti saadaan. Nykyaikaiset kaupalliset GNSS -SOC -vastaanotinpiirit seuraavat useita kymmeniä eri satelliittia samanaikaisesti, jos satelliitteja vain on näkyvissä niin paljon. Matkapuhelimen applikaatio löytää 29 eri GNSS -satelliittia pikaisen kokeen tuloksena. Lisäksi vastaanotinpiirit voivat seurata useamman eri GNSS-järjestelmän satelliitteja. [3]

GNSS-järjestelmien toiminta siviilikäytössä perustuu yleensä satelliittien lähettämään kantoaaltoon, johon on moduloitu koodi. Lisäksi paikanmäärittäykseen tarvitaan tarkka aikatieto ja satelliitin tarkka asema kiertoradalla. Satelliitista lähetetty koodi on tunnettu ja tunnetun ajastuksen kanssa voidaan määrittää satelliitin ja vastaanottimen koodipseudoetäisyys. Koodipseudoetäisyys saadaan, kun muunnetaan koodin jakson lähettämiseen kuluva aika vastaamaan signaalin kulkemaa matkaa ilmassa ilman siirtotien virheitä. Jos pelkän kantoaallon aallonpituuksien lukumäärä lasketaan, päästään tarkempaan etäisyyden määrittäykseen. Kun kantoaallon taajuuden käänteisarvo aallonpituus tunnetaan, voidaan määrittää etäisyys. Kantoaallon avulla saatua etäisyyttä kutsutaan vaihepseudoetäisyydeksi. Kantoaallon avulla etäisyyden laskenta on vaivalloisempaa ja reaaliaikainen paikanmäärittäminen ei välttämättä onnistu. Viimeisenä vaihtoehtona on käyttää hyväksi satelliitin lähettämän kantoaallon taajuuden doppler-siirtymää havaitsijan suhteen. Doppler-siirtymän perusteella on mahdollista laskea etäisyyttä satelliitin ja havaitsijan välillä. Satelliitti liikkuu nopeasti suhteessa havaitsijaan ja näin ollen myös satelliitista lähetetyssä signaalissa on doppler-siirtymää. Sijaintiaan määrittävällä havaitsijalla on tarkka tieto seurannassa olevan satelliitin kierto-radasta ja hetkellisestä paikasta. Vastaanotettavan signaalin doppler-siirtymää lähetyksen perustaajuudesta aletaan seurata. Peräkkäisten havaintojen perusteella voidaan määrittää havaitsijan sijaintia. Doppler-siirtymän muuttuminen kertoo satelliitin ylikulun vaiheista suhteessa havaitsijaan. Doppler-siirtymän suunta muuttuu sen hetken jälkeen, kun satelliitti on käynyt lähimmässä pisteessä suhteessa havaitsijaan. Samassa pisteessä doppler-siirtymän muutos on myös jyrkimmillään. Yleensä jälkimmäistä ilmiötä on käytetty hyödyksi, koska satelliitin lähettimen ja havaitsijan vastaanottimen oskillaattoreiden käyntitaajuuksien tarkka sovittaminen keskenään on varsin hankalaa. Doppler-siirtymän käyttö sijainnin määrittämisessä ei ole GNSS-järjestelmien yhteydessä enää kovin tavallista, vaikka sitä on historiallisesti yleisesti käytetty. Esimerkiksi Yhdysvaltain Transit -järjestelmä perustui doppler-ilmiön seuraamiseen. Järjestelmä ei kuitenkaan pystynyt jatkuva-aikaiseen sijainnin määrittäykseen ja sen tarkkuus oli parhaimmillaan siviilikäytössä noin 25 metriä. Nykyaikaisten GNSS-järjestelmien paikanmäärittäminen on reaaliaikaista ja vastaanotin voi toistaa määrittäystä melko usein (käytännössä esim. 1 kerta sekunnissa). Usean GNSS-järjestelmän tarkkuudeksi ilmoitetaan 10 m. Virhe vaihtelee tarkkuuden rajoissa ilmoitetulla todennäköisyydellä (esim. 95 %). [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]

Etenemistien vaikutusta voidaan tutkia jakamalla etenemistie ionosfääri- ja troposfääriosaan. Satelliitin lähettämä signaali kulkee ionosfääriosassa huomattavasti pidemmän matkan, kuin ilmakehään rajautuvassa troposfääriosassa. Ionosfääri sijaitsee GNSS-tarkastelussa noin 50 km - MEO-ratakorkeuden (23.000 km) etäisyydellä maan pinnalta. Kerroksessa on huomattavia määriä varattuja hiukkasia. Elektronien määrä vaihtelee huomattavan paljon. Eroa maapallon päivä- tai yöpuoleisessa osassa ionosfääriä on paljon (päiväpuolella noin 5 kertaa tiheämpi kuin yöpuolella). Auringon aktiivisuuden tilanne vaikuttaa varattujen hiukkasten määrään (maksimi $\approx 4 \times$ minimi). Myös vuodenaikojen välillä on säännöllistä vaihtelua (marraskuu $\approx 4 \times$ heinäkuu). Signaalin kannalta ionosfääri on dispersiivinen, jolloin eri taajuudet käyttäytyvät eri tavoin kanavassa. Dispersion vaikutusta voidaan poistaa useammalla eri taajuuksilla lähetettävien signaalien avulla, joilla voidaan tutkia kulkuaikojen eroja toisiinsa nähden. Ionosfäärin aiheuttama epävarmuus signaalin kulkumatkan tulkintaan on enimmillään kymmeniä metrejä. Ionosfääri voidaan jakaa osiin, alimmasta uloimpaan: D -kerros (50 km - 90 km), E -kerros (90 km - 140 km), F1 -kerros (140 km - 210 km), F2 -kerros (210 km - 1000 km). F1 - ja F2 -kerrokset yhtyvät F -kerrokseksi maapallon yöpuolisessa osassa. Tämän lisäksi voidaan havaita F+ -kerros, joka ulottuu 1000 km korkeudesta aina satelliitin MEO -kiertoratakorkeuksille asti. F+ -kerros koostuu ionisoituneesta vedystä (myös nimitys protonosfääri) ja heliumista. F+ -kerros aiheuttaa kymmenesosasta aina noin puoleen ionosfäärirefraktion kokonaisvirheestä, eli ionosfäärin aiheuttaman kulkumatkan virheen määrästä. F+ -kerroksen aiheuttama absoluuttinen virhe ei muutu suuresti maapallon päiväpuoleisen ja yöpuoleisen osien välillä, mutta vaihtelee merkittävästi auringon aktiivisuuden mukaan. Ionosfäärin virhettä poistetaan ionosfäärimallien avulla. [3]

Troposfäärissä signaali etenee ilmakehän eri kerrosten läpi ja alue jaetaan kuivaan ja kosteaan troposfääriin. Troposfääri ei ole dispersiivinen signaaleille. Sen sijaan signaali taipuu ilmakehän väliaineessa Snelliuksen lain mukaisesti, koska väliaine tihenee vastaanotinta kohti. Tämä merkitsee myös satelliitin korkeusasemalla (korkeuskulmalla) horisonttitason yläpuolella olevan vaikutusta etäisyyden mittausrvirheeseen. Jos korkeuskulma horisontista on alle 15° , voidaan troposfäärin virheen vaikutusta pitää liian suurena ja vastaanotettu signaali on liian huonolaatuinen paikanmäärittelyyn. Lähellä horisonttia virhe kasvaa varsin voimakkaasti. Troposfäärirefraktiosta 90 % aiheutuu kuivasta, eli hydrostaattisesta troposfääristä. Tämä koostuu pääosin typpi (N_2) ja happi (O_2) molekyyleistä. Kostea troposfääri puolestaan koostuu ilmakehän vesihöyrystä, jonka merkitys on noin 10 % troposfäärin refraktiosta. Vesihöyryn osuutta ilmakehässä on vaikea ennustaa, pilvet kuuluvat tähän osuuteen. Sen sijaan kuivan troposfäärin vaikutusta kuvaavia malleja on useita. [3]

GNSS -signaalit vaativat oikein toimiakseen suoran yhteyden lähettimen ja vastaanottimen välille. Jos signaali heijastuu jostakin pinnasta tai joistakin pinnoista vastaanottoon, tarkoittaa tilanne monitie-edennyttä signaalia ja luotettava etäisyyden määrittäminen perustuen kulkuajan laskentaan menetetään. Monitie-eteneminen aiheuttaa signaaliin vaihe-eron verrattuna suoraan vastaanotettuun signaaliin. Monitie-etenemisen todennäköisyys kasvaa satelliitin matalan korkeuskulman myötä. Monitie-edennyt signaali vaikuttaa koodipseudoetäisyyteen (signaalin kulkuajan ja kantoaallon koodin avulla laskettu matka ilman luonnollisten häiriöiden huomioonottoa) enemmän, kuin kantoaallon vaiheeseen. Hetkellinen muutos voi olla 10 m - 20 m luokkaa. Pahimmillaan satelliitin signaali voidaan menettää vastaanotossa. Monitie-edennyt signaali summautuu suoraan saapuneen signaalin kanssa, signaali

vastaanottimessa joko vahvistuu tai vaimenee. Signaalin heijastuminen vaikuttaa sen polarisaatioon, oikeakätinen ympyräpolarisaatio muuttuu vasenkätiseksi ympyräpolarisaatioksi GPS -järjestelmässä. Korjauksia aiheuttaviin asioihin kuuluvat maapallon geoidimuoto, suhteellisuusteorian mukaiset muutokset satelliittien radoissa ja luonnollisesti kohina. [3]

2.1 Maailmanlaajuiset satelliittijärjestelmät

Maailmanlaajuisesti toimivia ja siviilikäytön mahdollistavia satelliittijärjestelmiä on neljä: GPS, GLONASS, BeiDou ja Galileo. Näistä vain GPS on täysin rakennettu. Muut järjestelmät ovat vajaita suunnitellusta toteutuksesta (helmikuu 2020). Kaikki neljä järjestelmää ovat jatkuva-aikaisen sijainnin määrittämisen mahdollistavia. Kaikkia järjestelmiä on tarkoitus tulevaisuudessa vielä kehittää eteenpäin.

GPS

Tunnetuin ja eniten käytetty näistä navigointijärjestelmistä on GPS (Global Positioning System). Se on Yhdysvaltain armeijan ylläpitämä järjestelmä. Paikannuksen lisäksi sen kautta saadaan myös tarkka aika, jonka perusteella mm. Suomen virallinen kellonaika määrittyy [10]. Tällä hetkellä (helmikuu 2020) järjestelmässä on käytössä kaikkiaan 31 kappaletta aktiivisia satelliitteja. Ajan saatossa satelliittikanta on vaihtunut vanhempien satelliittien käyttöään loputtua. Lisäksi järjestelmää on kehitetty sen olemassaolon aikana käyttöönoton jälkeen. Uusia signaaleja (L5, L2C) on kehitetty myös siviilisovelluksia ajatellen. Navstar/GPS ensimmäinen satelliitti on laukaistu radalleen vuonna 1978 ja koko järjestelmä on ollut valmiina suunnitellussa kokoonpanossa vuodesta 1995. Alussa järjestelmässä oli käytössä tarkoituksellinen signaalin häirintä, SA (Selective Availability), joka poistettiin vuonna 2000. SA:n poistumisen tilapäisesti moni GPS -käyttäjä huomasi Persianlahden sodan alkaessa v. 1991, kun GPS yllättäen tarkentui. GPS:n tarkkuus paikannuksessa riippuu olosuhteista ja järjestelmän puolesta päästään parhaimmillaan jopa 0,715 m tarkkuuteen. [3, 6]

GLONASS

GLONASS luotiin GPS:n kilpailijaksi Neuvostoliiton toimesta. Koska USA:n armeija pystyi navigoimaan entistä tarkemmin ympäri maapalloa jatkuva-aikaisen satelliittijärjestelmän avulla, täytyi toisen suurvallan kyetä samaan. GLONASS -hanke on käynnistynyt 1982. 1996 järjestelmä on ollut laajimmillaan lähellä alun perin suunniteltua laajuutta. Tuon jälkeen järjestelmä alkoi taantua Venäjän taloudellisen tilanteen takia. Tällä hetkellä (2/2020) järjestelmässä on 24 satelliittia. Näistä 2 satelliittia eivät ole käytössä. Täydessä järjestelmässä on 24 satelliittia toiminnassa. Toisin kuin GPS, GLONASS on lähettänyt FDMA -signaalia, jolloin kullakin satelliitilla on oma lähetystaajuutensa lähetyskaistalla. Vanhimman sukupolven satelliitit ovat jo poissa käytöstä ja uudemman sukupolven satelliitteihin on tullut lisäksi mukaan myös CDMA -signaali. GLONASS -järjestelmän tarkkuudeksi ilmoitetaan 10 m. [3, 7]

BeiDou (BDS)

BeiDou (BDS, aiemmin Compass) on Kiinan valtion GNSS -järjestelmä. Järjestelmä oli ensimmäistä kertaa käytössä Kiinan alueella vuoden 2000 lopussa. Vuoden 2012 lopussa toinen vaihe tuli valmiiksi ja se kattoi Aasian ja Tyynenmeren alueen. Kolmas vaihe, eli koko järjestelmän täysi toiminta pitäisi olla valmiina kuluvan vuoden 2020 tienoilla. Järjestelmässä on aktiivisena tällä hetkellä (helmikuu 2020) 43 kpl satelliitteja. Yhteensä 53 satelliittia on tähän mennessä laukaistu BeiDou -järjestelmään. Järjestelmän on tarkoitus vielä kehittyä ominaisuuksiltaan. BeiDoun kaikki satelliitit eivät ole MEO -radalla, satelliiteista 5 on geostationaariradalla ja 3 geosynkronisella radalla. Nämä 8 satelliittia antavat Aasian-Tyynenmeren alueella tarkemman 5 m paikannuksen. Paikannuksen tarkkuus muualla on 10 m. [3, 8]

Galileo

Galileo on puhtaasti siviilikäyttöön ja -sovelluksiin rakenteilla oleva järjestelmä. Sen rakentajana on EU. Galileon laatua on ohjannut ilmailun luotettavuusvaatimukset. Täysi Galileo -järjestelmä sisältää yhteensä 30 satelliittia, joista 24 satelliittia on aktiivisia ja 6 satelliittia on varalla. Järjestelmää on alettu rakentaa 2011. Nyt, vuoden 2020 alussa järjestelmä on lähes valmis. Kiertoradoilla on 22 toimintakuntoista satelliittia. Lisäksi kahta satelliittia testataan ja 2 on pois käytöstä. Satelliitit ovat kolmella eri kiertoratatasolla MEO -ratakorkeudella. Tarkkuus paikannuksessa on 2 m. [3, 9, 11]

2.2 Alueelliset GNSS -järjestelmät

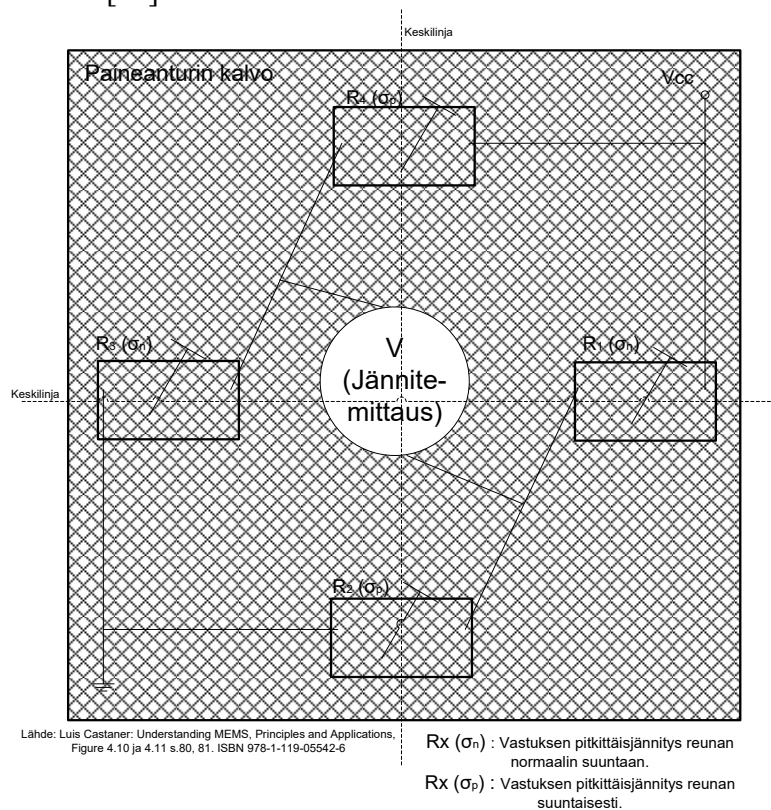
IRNSS (Indian Regional Navigational Satellite System) on Intian valtion rakentama alueellinen järjestelmä. Järjestelmällä paikannetaan enintään 20 metrin tarkkuudella aluetta, joka kattaa Intian ja 1500 kilometriä Intian rajojen ulkopuolelle. Se koostuu 7 satelliitista, joista 3 on geostationaarisella radalla ja 4 geosynkronisella radalla. Satelliitit on laukaistu radalle kesän 2013 ja kevään 2016 välillä. [12]

GNSS -järjestelmiä täydentävät muutamat maantieteellisesti rajatuille alueille tarkoitetut satelliittipaikannusjärjestelmät. SBAS (Satellite Based Augmentation System) -järjestelmät tarkentavat ja parantavat halutun GNSS-pääjärjestelmän satelliittinavigoinnin tarkkuutta. Näiden järjestelmien satelliitit ovat poikkeavilla ratakorkeuksilla ja ratamuodoilla verrattuna järjestelmien käyttämään pääjärjestelmään, kuten GPS. Vanhin näistä järjestelmistä on WAAS (Wide Area Augmentation System), joka on Yhdysvaltain ilmailuhallinnon järjestelmä. WAAS kattaa Yhdysvaltain ja Kanadan alueet. WAAS tarkentaa GPS -järjestelmää. WAAS sisältää 3 geostationaarisatelliittia, 38 referenssimaa-asemaa (joiden sijainti tarkkaan tunnettu), 3 yliasemaa (jotka koostavat referenssiasemien sijaintitiedot ja välittävät sen perusteella kerran sekunnissa tarkentavaa korjaustietoa eteenpäin) ja 6 linkkiasemaa. Linkkiasemat välittävät yliasemien määrittämän korjaustiedon geostationaariradan satelliiteille, joista se välittyy edelleen paikantaviin vastaanottimiin. GPS/WAAS -vastaanottimet prosessoivat paikannusta tarkentavan WAAS-järjestelmän viestin osana paikannusta. QZSS (Quasi-Zenith Satellite System) on Japanin paikallinen lisä GPS -satelliittinavigoinnille. QZSS koostuu kolmesta hyvin elliptisellä sadalla kiertävästä satelliitista. Lisäksi järjestelmään kuuluu geostationaarisella kiertoradalla oleva MTSAT -tietoliikennesatelliitti, joka välittää paikannuksen korjaustietoa. Vastaavia järjestelmiä on muitakin ja myös suunnitteilla on muutamia. [3, 13]

3. MEMS TEKNOLOGIA JA ERI SENSORIT

3.1 MEMS toteutuksen periaatteita

MEMS (Micro Electro Mechanical System) on puolijohdepiirien valmistusteknologia. Tällä tavalla valmistettuihin piireihin on rakennettu usein jokin fyysisesti liikkuva osa tai liikkuvia osia. Osat voivat liikkua joko vapaasti tai sitten liikkuvia osia voidaan ohjata liikkumaan piirin sisäisten sähköisten kytkentöjen avulla. MEMS -piirin toteutuksessa mekaanisia toimintoja käsittävä elementti ja sen toimintaa tulkitseva mikropiiri voivat olla joko samaan piihin tehtyjä tai sitten erillisiä, toisiinsa kytkettyjä puolijohdekappaleita (tyypillisimmin erillisiä). Sähköisen mittauksen kannalta pietsoresistiiviset ohutkalvovastukset, muuttuva-arvoiset kondensaattorit ja vaikkapa näiden avulla toteutettu Wheatstone -tyyppinen siltakytkentä ovat keskeisiä käsitteitä MEMS -teknologialle. Pietsoresistiivinen elementti reagoi ominaisvastuksen muutoksella mekaaniseen jännitykseen. Pietsoresistiivisiä vastuksia voidaan konstruoida liikkuvien elementtien pintaan. Wheatstone -siltakytkentä on hyvin helposti toteutettava mittauskytkentä vastusarvojen ja kapasitanssiarvojen muutoksien seurantaan. [14]



Kuva 4. Esimerkki Wheatstone -sillan käytöstä MEMS -komponentissa [14].

Tavallisen mittauskytkennän voidaan ajatella olevan siltapiiri (kuva 4), jossa mittaushaarojen 4 vastusta ($R_1 - R_4$) ovat saman suuruisia keskenään dimensioiltaan. Paineanturin paineentunnistuskalvoon voidaan integroida pietsoresistiivisiä vastuksia, joiden vastus muuttuu paineen aiheuttaman taipuman mukaan. Vastukset ovat lisäksi konstruoitu kalvon pintaan pareittain symmetrisesti. Sähköisesti vastusparit ovat

kytkettyjä päinvastaiseen järjestykseen. Kytkenässä on neljä vastusta siten, että toinen haara on $R_A = R_1 + R_2$ ja toinen $R_B = R_3 + R_4$. Symmetrian vuoksi kalvon liikkuaessa $R_1 = R_4$ ja $R_2 = R_3$. Identtiset vastusparit asemoidaan mittauspisteisiin toisiinsa nähden symmetrisesti ajatellen liikkuvien osien liikettä ja liikkeen vastuksiin aiheuttamaa muutosta. Tällöin jännityksen aiheuttama sähköisen potentiaalin muutos näkyy maksimaalisena erona siltapiirissä. [14]

Levykondensaattorin ominaisuuksissa elektrodien etäisyys toisistaan on suoraan merkitsevä tekijä kapasitanssille. Kondensaattorin rakenne voidaan toteuttaa siten, että toinen kondensaattorin elektrodeista on kiinnitetty paikalleen ja toinen voi liikkua edestakaisin suhteessa kiinnitettyyn elektrodiin, seurauksena on arvoltaan muuttuva kondensaattori.

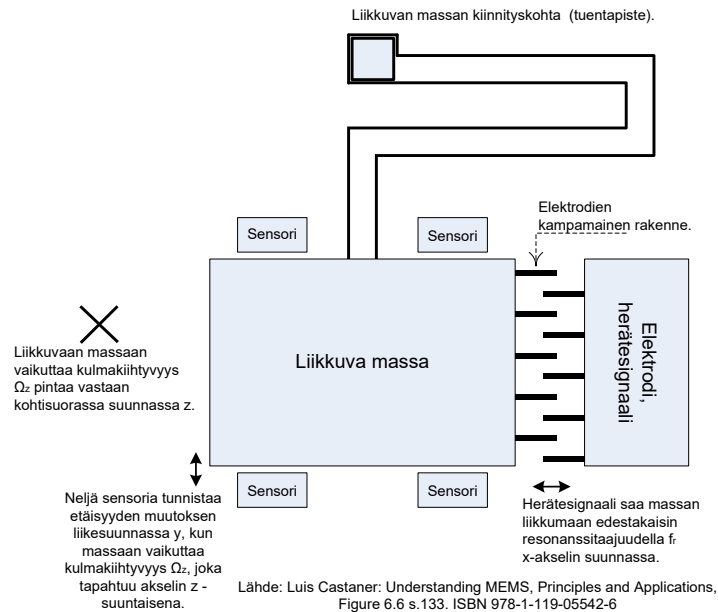
MEMS on tänä päivänä hyvin tavallinen puolijohdepiiri. Erilaiset MEMS -piirit ovat perusta varsin monenlaisille elektroniikkalaitteelle. Etenkin tavalla tai toisella liikkeen tunnistamiseen tarkoitettu laite tai sovellus käyttää hyvin todennäköisesti jotakin tai joitakin MEMS -piirejä. MEMS -teknologian etuna tänä päivänä on sen hyvin halpa hinta. MEMS -teknologialla tehdään ainakin kiihtyvyysantureita, gyroskooppiantureita, kallistuskulman tunnistavia antureita, paineantureita, magnetometreja, kosteusantureita, kytkimiä, oskillaattoreita ja jopa optisia järjestelmiä. Lisäksi MEMS -piireissä voi olla myös muita toimintoja, kuten esimerkiksi lämpötilan mittausta, AD -muunnin, muistia mittaustietojen keräämiseen (esimerkiksi FIFO -tyyppinen), toiminnallista logiikkaa, yksi tai useita tiedonsiirtoväyliä. Usean anturityypin integroiminen samaan koteloon etenkin liikeantureiden kohdalla on yleistynyt voimakkaasti.

3.2 Sensoritoteutuksia

KIIHTYVYYSANTURI

Kiihtyvyysanturin toiminta perustuu tyypillisesti piiriin rakennettuun vapaasti liikkuvaan massaan ja massan liikkeen tunnistamiseen (massan hitauden periaate), tai värähtelevän massan värähtelytaajuuden muuttumiseen jännityksen muutoksen seurauksena. Tällainen anturi voi toimia kolmen ulottuvuuden suhteen (x-, y- ja z-akselin suhteen). Piirissä oleva rakenne liikkuu tällöin vastaavan akselin suuntaan. Mitattava kiihtyvyys voi olla joko pieni (noin $0 - 2 g_n$, $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$) tai hyvin suuri ($100 g_n$). Piirit kestävät fyysisesti myös hyvin suuria kiihtyvyyksiä hetkellisesti (iskuja), jopa $10000 g_n$. Mittauksen resoluutio riippuu paljon mittaustietojen laajuudesta ja analogisen kiihtyvyyssignaalien digitoimisen resoluutiosta (muunnostarkkuus ja näytteenotusväli) ja kohinasta AD -muunnoksessa. Hyvin tyypillisesti AD -muunnoksien muunnostarkkuus on 12 - 16 bittiä halvoissakin kaupallisissa komponenteissa ja näytteenotusväli alle yhdestä hertsistä useisiin kilohertzeihin (esim. ST Microelectronics LSM6DSO, Bosch BMA270, TDK InvenSense ICM-42605). Koska maan vetovoima ja sen suunta ovat yksi tärkeimmistä kiihtyvyyssanturin mittauksista, paikallaan oleva sensori ilmaisee kappaleen tietoa kappaleen asennosta suhteessa likimain maapallon keskipisteeseen. [14, 15]

GYROSKOOPPIANTURI



Kuva 5. Kaaviokuva gyroskooppisensorin rakenteesta ja toimintaperiaatteesta [14].

Gyroskooppi pyrkii luonteensa mukaisesti pitämään paikkansa avaruuteensa nähden, eikä siirry liikkeen mukana. Gyroskooppitoteutuksia on monenlaisia, joista tunnetuin lienee hyrrä. MEMS -teknologialla toteutettu anturi on hyvin pienikokoinen ja liikkuva massa on myös hyvin pieni. Liikkuva massa toteutetaan hyvin usein siten, että piirin piirunkoon tuettua liikkuvaa massaa liikutetaan aktiivisesti laittamalla se värähtelemään rakenteen mekaanisen resonanssin taajuudella (kuva 5). Rakenteesta voi käyttää myös nimitystä äänirauta (tuning fork). Värähtelevä kappale ei pyöri minkään akselinsa ympäri, vaan tekee säännöllistä edestakaisiin liikettä. Tämä liike saa aikaan gyroskooppisen efektin. Foucault'n heilurissa on samaa ilmiötä: Edestakainen liike pyrkii pitämään heilumissuuntansa avaruuteen nähden. Foucault'n heiluri on tuettu yhdestä pisteestä siten, että heiluriliikettä tekevä massa pystyy pitämään vapaasti liikesuuntansa (avaruuteen nähden). Liikkeelle päästämisen jälkeen Foucault'n heilurin liikkeeseen ei enää puututa. Maapallon pyörimisen seurauksena katsojan silmissä Foucault'n heilurin liikesuunta näyttää hitaasti muuttuvan. MEMS -mikropiirin resonanssigyroskooppi on huomattavasti jäykemmin tuettu kuin Foucault'n heiluri, eikä pääse yhtä vapaasti kääntymään. Resonanssigyroskooppi ilmaisee Corioliskiihtyvyyttä (Coriolisvoimaa). Jos massaa liikutetaan x -akselin suunnassa, poikkeama y -akselin suunnassa, eli massan liikesuuntaa kohtisuorassa suunnassa on Coriolis-voiman aiheuttama. Tämä liike kertoo kolmannen ulottuvuussuunnan (z - akseli) kulmakiihtyvyydestä ja x -akselin suuntaisesta siirtymästä. Tyypillisesti gyroskooppi on suhteellisesti tarkasteltuna kaikkein heikoin MEMS -liikesensori verrattuna muihin liikesensoreihin niiden omissa käyttötarkoituksissa. Gyroskooppisensorin virhe ja epätarkkuudet yleensä sanelevat MEMS -sensoreihin perustuvan järjestelmän suorituskyvyn rajan, vaikka mukana olisi muita ja parempilaatuksia sensorityyppejä. Kaupalliset gyrosensorit mittaavat kulmakiihtyvyyttä ± 125 °/sec - ± 2000 °/sec riippuen skaalauksesta, AD -muunnos voi olla 16 bittiä leveä, mittauksen tahti (ODR, Output Data Rate) voi olla kymmenen

hertsin luokasta noin 6 - 8 kilohertsin taajuuteen (esim. ST Microelectronics LSM6DSO, Bosch BMA270, TDK Invensense ICM-42605). Mittaus tapahtuu kappaleen (sensorin) kolmen ulottuvuuden suhteen. [14, 15]

MAGNETOMETRIANTURI

Kolmen ortogonaalisen mittausakselin MEMS -magnetometrisensori kykenee tunnistamaan maan magneettikenttävektorin suunnan. Tällöin sen käyttö kompassina on mahdollista. Tyypillisesti tämän päivän MEMS -magneettikenttäsensori kykenee mittaamaan magneettikenttää noin $0,3 \mu\text{T}$ resoluutiolla ja mittausalue on $\pm 1,3 \text{ mT} - \pm 5 \text{ mT}$ (esim. ST LIS2MDL, Bosch BMM150). Magnetometrinä toimiva MEMS -sensori voi käyttää toimintaperiaatteena Lorenz -voiman mittaamista (magneettikentän vuorovaikutus siihen asetetun johtimen kanssa). Maan magneettikenttään tulevat häiriöt mm. sähkövoimalinjoista, kestopagneeteista, luonnonilmiöistä ja itse mittalaitteesta vääristävät mittauksia. Staattisen ja varsin vakioarvoisen maan magneettikentän tunnistamisen avulla voidaan päätellä liikkeen suuntaa ja suunnan muutosta suhteessa maapalloon. Usein magneettikentän mittaus on hitaampaa verrattuna muihin käsittelyn alla oleviin MEMS -sensorimittauksiin. Esimerkiksi Bosch BMM150 magneettikenttäanturin mittausdatanannon taajuus ODR (Output Data Rate) on enintään 30 Hz, ST LIS2MDL ODR on puolestaan 100 Hz. Edellä mainituilla kiihtyvyyssantureilla ja gyroskooppiantureilla ODR voi olla useita kilohertsejä. [14, 16, 17]

PAINEANTURI

MEMS -paineanturin toiminta perustuu joko pietsoresistiivisen sillan tai pietsokapasitiivisen sillan muodostamiseen ja mittaamiseen (kuva 4). Tavallisesti mittauselektroniikka (AD -muunnin ja lukeman tulkinta) on jo valmiiksi mukana komponentissa ja mittaus on yleensä myös kalibroitu. Painelukema saadaan digitaalisena lukemana sarjaväylän kautta. Sovelluksen rakentaminen sähköisen toiminnan suhteen on helpompaa verrattuna analogisen suureen antavaan sensoriin. MEMS -paineanturin hinta on yleensä kohtuullinen. Tyypillisen MEMS -paineanturin resoluutio korkeusmittauksessa on enintään metrin luokkaa. Parhaimmilla sensoreilla voidaan havaita noin 20 cm korkeuden muutos. Koko dynaaminen mittausalue on tavallisesti noin 300 mbar - 1300 mbar. AD -muunnoksen tarkkuus voi olla 24 bittiä (esimerkiksi Infineon DPS310). Vedenkesto aiheuttaa näille komponenteille jo selvästi haasteita. Vedenkestäviä MEMS -paineantureita kuitenkin on usealla valmistajalla (esimerkiksi TE MS803-05BA, Alps Alpine HSPPAD143A). Välttämättömänä lisäominaisuutena kaikissa autonomisesti paineen määrittävissä paineantureissa on tarkka lämpötilan mittaus. Tämä vaatimus tulee kaasujen tilayhtälöstä. Paineanturin ja myös magnetometrin avulla liikettä voidaan seurata epäsuorasti. Liike muuttaa mittausanturin asemaa ja näin ollen mitattavissa olevaa parametria. Ilmanpaineesta johdetun korkeuden muuttuminen ja maan magneettikentän vektorin suunnan muuttumisen tulkinta suunnan muuttumisesta voidaan ymmärtää tällä tavoin. [2, 14]

4. LIIKEANTURIT PAIKANMÄÄRITYKSESSÄ

Kiihtyvyysanturi tunnistaa itseensä kohdistuvat kiihtyvyydet. Maan vetovoima tuottaa aina vakioarvoisen yhden g_n kiihtyvyyden mittaukseen. Tämä arvo muuttuu, kun havaitaan esimerkiksi vapaata putoamista ($0 g_n$) ja sitä seuraavassa äkillisessä pysähtymisessä maahan tai alustaan (esim. $8 g_n$). Ideaalisessa tapauksessa tasavauhtinen liike ei aiheuta kiihtyvyyttä mitattavalle kappaleelle, vain muuttuva nopeus aiheuttaa kiihtyvyyttä. Kun kappale tai henkilö on liikkeessä, kiihtyvyys riippuu paljon liikkumisen tavasta ja olosuhteista (hissi, portaissa kävely, pyöräily). Lisäksi kiihtyvyysanturin kiinnityskohdalla eli havaintopisteellä suhteessa mitattavaan kappaleeseen on suuri merkitys. Jos ajatellaan tapausta, jossa kappaleessa on liikkuva nivel (-liitos). Liikkuvaan osaan tai orteen halutaan laittaa liikeanturi. On huomattava, että mittausta tekevä sensori rekisteröi eri kiihtyvyyttä eri etäisyydellä niveleen. Kauempana nivelestä kiihtyvyys on suurempaa, kuin lähempänä niveltä. Maan pinnan suuntaisesti liikuttaessa liikkeelle lähtö ja pysähtyminen tuottavat kiihtyvyyttä. Tämä kiihtyvyys on yleensä aika pientä magnitudiltaan. Pidempään jatkuva $1 g_n$ kiihtyvyys on jo suhteellisen voimakasta. Etenkin ihmisen liikkeiden kiihtyvyyksiä mitattaessa sen suunta vaihtelee paljon. Kuten edellä mainittiin, kiihtyvyysanturin kiinnityspiste henkilössä on äärimmäisen merkittävä asia. Esimerkiksi käsivarsi ja vaikkapa selkärangan kohta lapaluiden välissä antavat aivan erilaisen tuloksen. Kiihtyvyysanturitiedosta kyetään kuitenkin päättelemään nopeutta ja kuljettua matkaa. [1, 2]

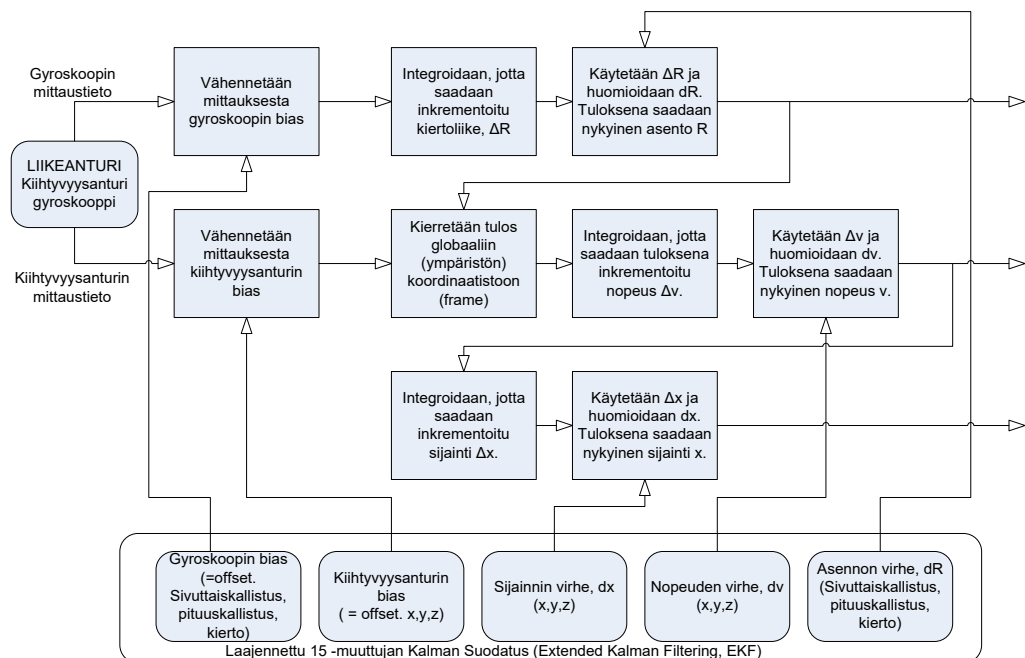
Gyroskooppisensori kertoo, miten liikkeen suunta on muuttumassa. Kiertyvä liike tulee gyroskoopin avulla ilmaistuksi hyvin. Näin esimerkiksi kääntymiselle (lähinnä maanpinnan suuntaiselle) tulee toinen selvä ilmaisin magnetometrin kanssa. Gyroskooppi on parempilaatuinen ilmaisin tässä suhteessa, koska magneettikenttää ilmaiseva sensori on tavallisesti helpompi häiriintymään ja on myös hitaampi vasteajaltaan verrattuna gyrosensoriin. Staattisessa, jatkuva-aikaisessa suunnan tarkastelussa taas magneettikenttäilmaisin on verraton ja pelkkä MEMS-gyroskooppisensori käyttökelpoton mielivaltaisella hetkellä suunnan määrittämiseen. MEMS -gyroskooppisensori kykenee ilmaisemaan vain suunnan muuttumista ja sen laatua, eikä kykene määrittämään itsenäisesti hetkellistä asemaa tai asentoa. [1, 2, 14]

Magnetometrin avulla voidaan määrittää kappaleen hetkellistä asentoa suhteessa maan magneettikenttään. Maan magneettikentän voimakkuus maan pinnalla vaihtelee paikallisesti n. $25 \mu T - 65 \mu T$ välillä (Oulun seudulla n. $55 \mu T$). Lisäksi kompassiin vaikuttavat kaksi tunnettua asiaa: eranto ja inkliinaatio. Eranto, eli deklinaatio on magneettisen pohjoissuunnan poikkeama maantieteellisestä pohjoissuunnasta. Eranto on maanpinnan tason mukaan tulkittava suure. Eranto on noin $10,5^\circ$ Oulun seudulla. Inkliinaatio, eli maanpintaa kohtisuoraa vastaan oleva magneettikentän komponentti, voi myös olla merkittävä ($0^\circ - 90^\circ$). Oulun seudulla inkliinaatio on noin 76° . Tämä tarkoittaa, että Oulussa kompassineulan pitäisi periaatteessa osoittaa erannon lisäksi lähes kohtisuoraa alas maahan noin 76° kulmassa maanpinnan suhteen. Häiriintyvyys on selkeästi magnetometrin heikko kohta, koska maan magneettikenttä on suhteellisen heikko verrattuna useimpiin (teknillisiin) häiriöihin. Ympäristön häiriöt ovat paikallisia ja vaihtelevat voimakkaasti. Laitteessa itsessään voi olla osia, jotka aiheuttavat häiriötä maan magneettikentän mittaamiselle. Kaikki magneetoituva aine ja magneettikentän itsensä ympärille tuottavat toimilaitteet (esim. sähkömoottorit) häiritsevät mittaamista. Magnetometri täytyy tavallisesti kalibroida tavalla tai toisella

toimintaympäristöönsä. Kalibroinnissa huomioidaan mittalaitteen tuottama häiriö magneettikentän mittaukseen. Samoin kalibrointi huomioi ympäristön häiriön, mutta vain kalibrointipaikalla. [1, 2, 16]

Sensoreiden keräämän mittaustiedon matemaattisen käsittelyn avulla eri sensoreiden tuloksia voidaan käsitellä erikseen, skaalata tuloksia ja yhdistellä niitä. Yhdistelyssä on tärkeää huomata sensoreiden erot esimerkiksi näytteistystaajuuksien suhteen. Tällaista yhdistelyprosessia sanotaan sensori fuusioksi ja tarkoituksena on tuottaa mahdollisimman tarkka kuva kappaleen asennosta ja liikkeistä. Pidemmälle vietyä voidaan päätellä jopa kuljettua reittiä. [1, 2]

Mittaustietojen käsittelyssä käytetään usein Madgwickin algoritmia, Mahonyn algoritmia, tai Kalman -suodatusta, komplementaarista suodatusta (Complementary Filter, CF) tai jotakin muuta matemaattista suodatusta. Kalman -suodatus tasoittaa signaalin kohinaisuutta. Se on usein pohjana algoritmille, jonka avulla jotakin liikkeen parametriä halutaan ilmaista. Komplementaarisessa suodatuksessa on tavallisesti kyse eri lähteistä (erityyppisiltä sensorilta) saatujen kahden saman parametrin estimaatin yhdistämisestä yhdeksi informaatioksi. Algoritmeja voi kehittää ja muuntaa valmiista malleista sovelluksen käyttötarkoituksen ja sensorivalikoiman mukaan. Suodatuksen matemaattisena esitystapana voidaan käyttää joko Eulerin kulmien mukaista matriisiesitystä tai kvaternio (quaternion) -esitysmuotoa. Jälkimmäinen esitystapa on kompleksilaskennan laajennus, jossa esitetty termi sisältää yhden reaali-osan ja kolme imaginaariosaa. Kvaternion -termin kolmea imaginaariosaa kutsutaan yhteisesti vektoriksi. Vektorin komponentit ovat toisiinsa nähden ortogonaalisia. Kvaternio -esitysmuodolla säästetään laskentaa ja vältetään Eulerin kulmien matriisilaskennan singulariteetti, jossa törmätään mahdottomaan ratkaisuun (gimbal lock). Periaatteellisenä erona voidaan Eulerin kulmien ja kvaternio esitystapojen välillä pitää sitä, että Eulerin kulma kuvaa paikkaa, mutta kvaternio kuvaa muutosta verrattuna edelliseen laskentapisteeseen. [1, 2, 18, 19, 20]



Lähde: Robert Harle: A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrian,
IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol 15, No. 3, 3rd Quarter 2013.

Kuva 6. Algoritmi sensoritietojen yhdistelylle (sensori fuusio) [1].

Suodattimia hyväksi käyttäen voidaan tutkia sensoreiden tietoa ja tehdä niistä edelleen päätelmiä. Esimerkiksi kävelyn kaltainen liikkuminen voi olla helppo ilmaista suotuisassa tilanteessa. Kävelyyn liittyy olennaisena piirteenä rytmisen liike, minkä voi nähdä kiihtyvyyssanturin avulla. Samoin voi selkeitä nousuja ja laskuja ilmaista suoraan paineanturin avulla. Kun siirrytään askellaskurista kohti reitinseurantaa, täytyy mukaan ottaa selvästi enemmän tietoa (gyroskooppi ja magnetometri). Näin myös virheiden osuus alkaa tulla merkittäväksi, puhumattakaan algoritmista, jonka tarkoitus on poistaa virhettä ja yhdistellä sensorien tietoja. Eri sensoreiden toistensa suhteen päällekkäinen tieto voi auttaa myös halutun monimutkaisemman tuloksen luotettavuudessa. Kuvassa 6 on esitetty eräs periaate sensorimittausten käsittelylle, jossa sensoreiden sisäisiä virheitä huomioidaan ja mittaustuloksia yhdistellään. [1, 2, 18, 19]

Sensoreiden epätarkkuudet johtuvat pääasiassa lämpökohinasta, bias -termistä (sensorin mittaustiedon offset eli poikkeama), vasteen epälineaarisuudesta, kalibroinnin epätarkkuudesta ja lämpötilariippuvista ilmiöistä. Kohinan vaikutusta sensorin vasteeseen voidaan tutkia Allan -varianssin avulla. Allan -varianssi on kohinan tehosiheyden paloittaista tutkimista ajallisesti. Epälineaarisuutta on helpointa tutkia datalehden parametreista. Piirityypistä riippuen kalibrointi voi piirissä olla jo valmiina. Lämpötilariippuvat ilmiöt tarkoittavat usein bias -termin muuttumista (offset muuttuu), jolloin vastekin muuttuu hivenen. [15, 21]

5. KOKEIDEN SUUNNITTELU

Kokeissa haluttiin tutkia liikeantureiden vastetta ST Microelectronics SensorTile.box MEMS -sensorilaitteen avulla. Laite on tehty kaupallisia tarkoituksia varten ja sen avulla pitäisi saada kuvaa valmistajansa MEMS -sensoreiden toiminnasta. Laitteen ohjaamiseen on oma sovelluksensa Android -mobiililaitetta varten. Työssä tarkoitus on tutkia sensoreiden ominaisuuksia navigaation ja reitinseurannan tueksi.



Kuva 7. Tutkittavana ollut ST SensorTile.box. Kuvassa laitteen asema ranteessa koetilanteissa.

Kokeita tehtiin sisätilaolosuhteissa. SensorTile.box sisältää 7 erilaista MEMS -sensoria. Sensoreita on enemmän, kuin tämän työn vaatimukset edellyttävät. Näin myös itse laite on tarkoitettu lisäksi tästä työstä poikkeaviin tutkimuksiin. Laite on myös yksittäisten sensoreiden toiminnallisen tutkimisen apuväline. SensorTile.box kerää lähinnä sensorien tietoa tallentavaksi ja sen avulla voi esikäsitellä sensoreiden keräämää tietoa. Pidemmälle vietyä SensorTile.box -laitteeseen voi tehdä sisätilanavigointia varten sovelluksen. Siinä tilanteessa työn suoritus aika tulisi olemaan epärealistisen suuri tällaiseen työhön. Näin myös tehdyt kokeet ovat systeemin valmiiden toiminnallisuuksien rajoittamat ja mahdollistamat. SensorTile.boxin kohdalla pyritti selvittämään enemmän periaatteellista valmiutta reitin seurantaan MEMS -sensoreiden avulla. Kuva 7 näyttää laitteen fyysisen koon ja mittauspisteen kehossa. SensorTile.box oli koetilanteissa sidottuna rannetta vasten. [22, 23]

6. MITTAUKSET

Tutustuminen laitteen toimintaan oli varsin helpon oloista, mutta ei yllätyksetöntä. Esimerkiksi tiedonkeruu toi mukanaan yllätyksiä. Laite tallentaa omaan sisäiseen muistiin todella vähän tietoa, enintään 10000 tavua. Suurehko näytteistystaajuus ja usean sensorin tiedonkeruu jää ajallisesti lyhyeksi. Mobiililaitteen sovellus tallentaa myös sensorien dataa Bluetooth Low energy -kanavan läpi.

6.1 Mittausjärjestely ja asetukset

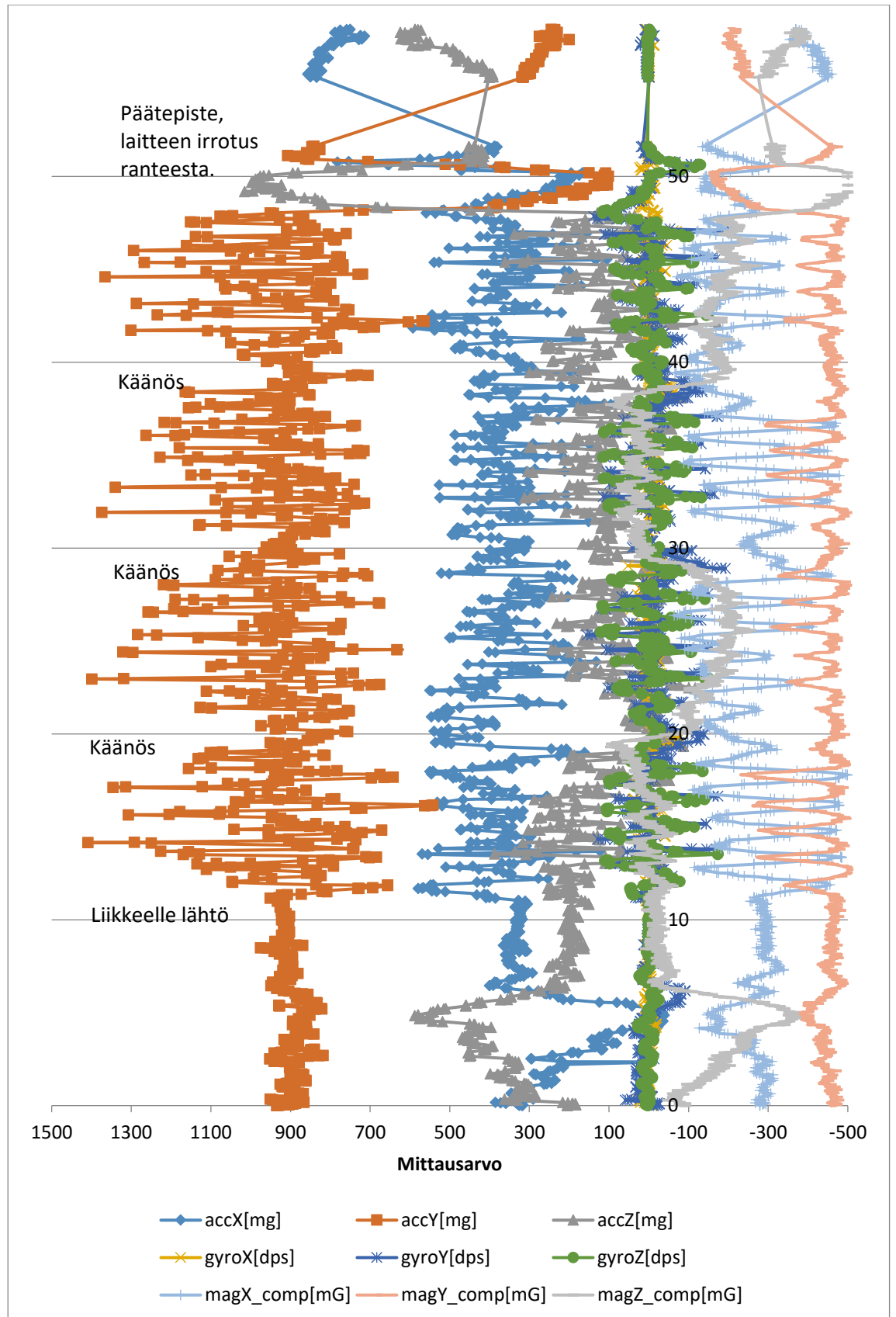
Mittauksena esitetään koe, jossa on kävelty sisätiloissa 23 askelparia, matka noin 25 metriä. Tallennuksen kesto on noin yksi minuutti. Kokeessa on kävelty edestakaisin suoraa linjaa, jonka päässä on aina käännytty takaisin. Suora on kävelty päästä päähän kahdesti, kävelyn alku, käännökset ja loppu samassa kohdassa. Taulukossa 2 on esitetty mittauksessa käytetyt sensorit ja niiden mittausalueet.

Taulukko 2. Kokeissa hyödynnettyjen sensoreiden asetukset

Sensori	Sensoryyppi	Mittausalue	ODR	Muuta
LIS2DW12	Kiihtyvyysanturi	$\pm 2g$	50 Hz	
LSM6DSL	Kiihtyvyysanturi ja gyrosensori	$\pm 2000 \text{ dps}$	52 Hz	Vain gyrosensoria on käytetty.
LIS2MDL	Magnetometri	$\pm 49,152$ Gauss	50 Hz	Kalibroitu tila, voidaan käyttää kompassinakin.

6.2 Mittaustulokset

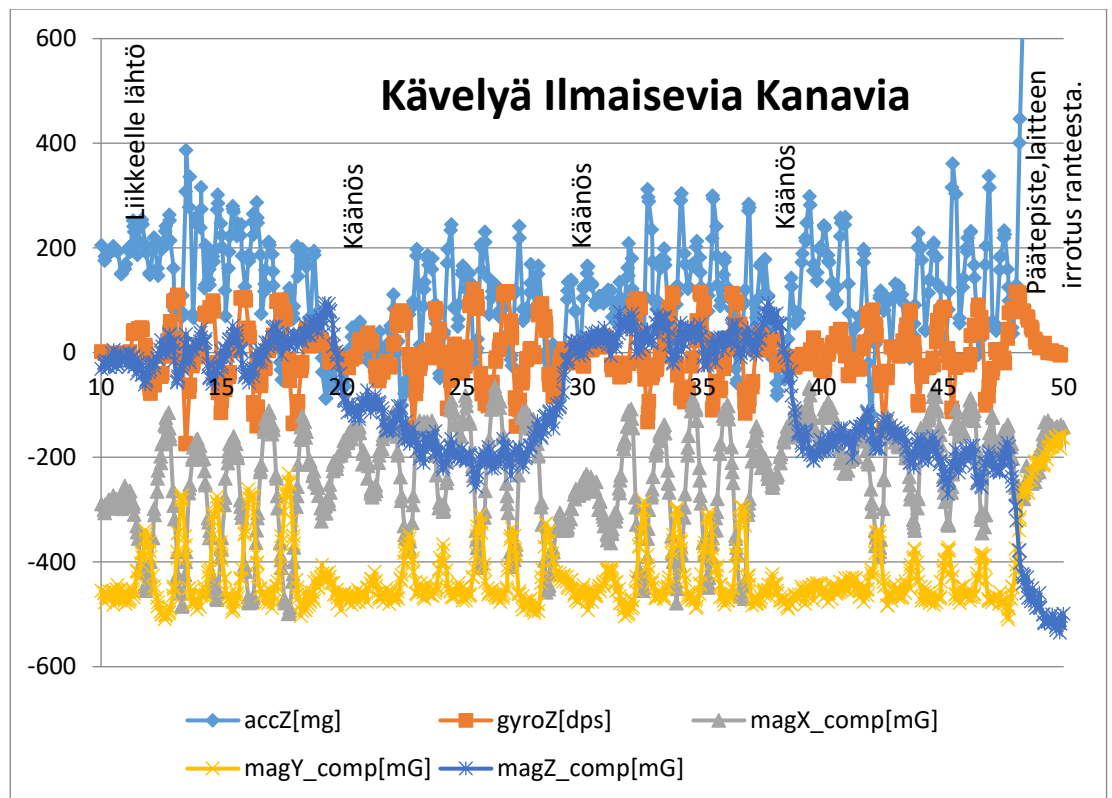
Tietoa ei ole tässä käsitelty lainkaan ja se näyttää liikkeen aikaisen raajan sensorimittauksen tuloksen. Kuvaan 8 on merkitty kokeen suorituksen tapahtumat: alku, käännöshetket ja lopetus. Käyrinä on esitetty kolmen MEMS -anturin LIS2DW12, LSM6MSOX ja LIS2MDL mittausdata kaikkien mittausakselien suhteen. Vaaka-akselin numeeristen arvojen yksiköt on mainittu kunkin käyrän nimen jälkeen: [mg] = milli g, [dps] = astetta sekunnissa (degrees per second), [mG] = milli Gauss.



Kuva 8. Kävely sisätilassa.

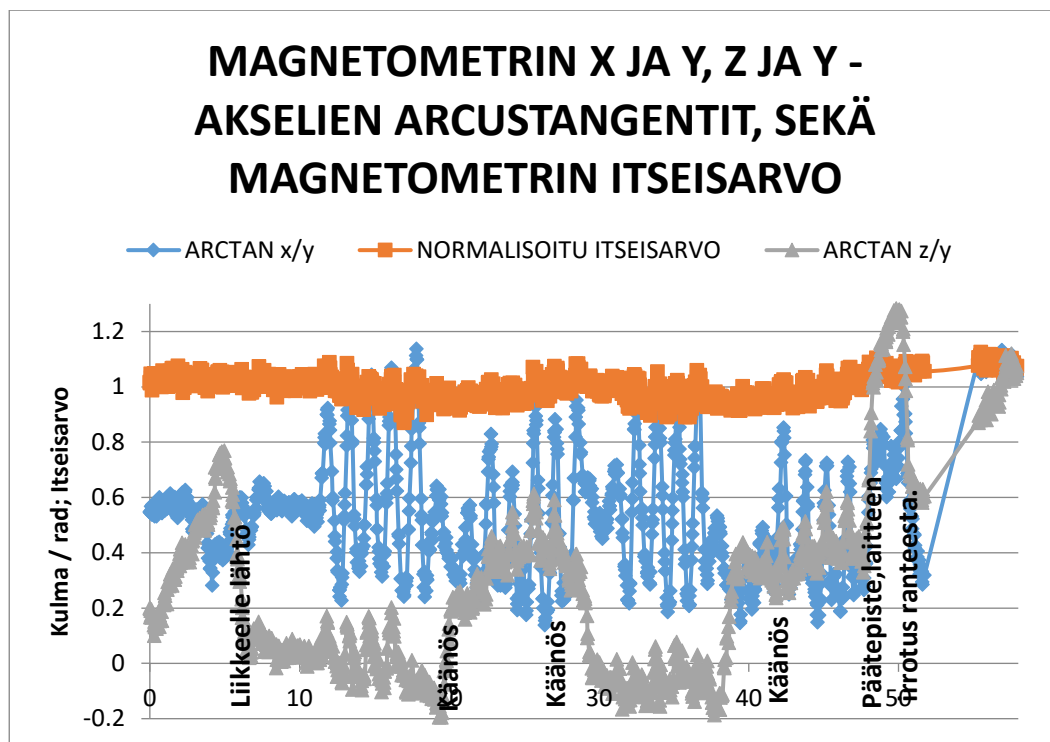
7. TULOSTEN KÄSITTELY JA VIRHEEN ARVIOIMINEN

SensorTile.box tallensi dataa kävelystä ja sen näyteavaruutta voisi käsitellä matemaattisin menetelmin, mitä kuitenkin ei alettu tehdä. Kuvasta 8 voidaan huomata, että kaikki sensorit reagoivat kävelyyn jollakin tavalla. ”Piikitys” on säännöllistä kaikilla sensoreilla ainakin jonkin akselin suhteen. Kiihtyvyysanturin mittaustuloksissa on silmämääräisesti arvioituna eniten vaihtelua peräkkäisten mittausten välillä. Tästä voidaan myös päätellä, että käsivarsi liikkuu kävelyn aikana myös muihin suuntiin, kuin vain rytmisesti edestakaisin kulkusuunnan mukaan (luku 4, s.19) [2].



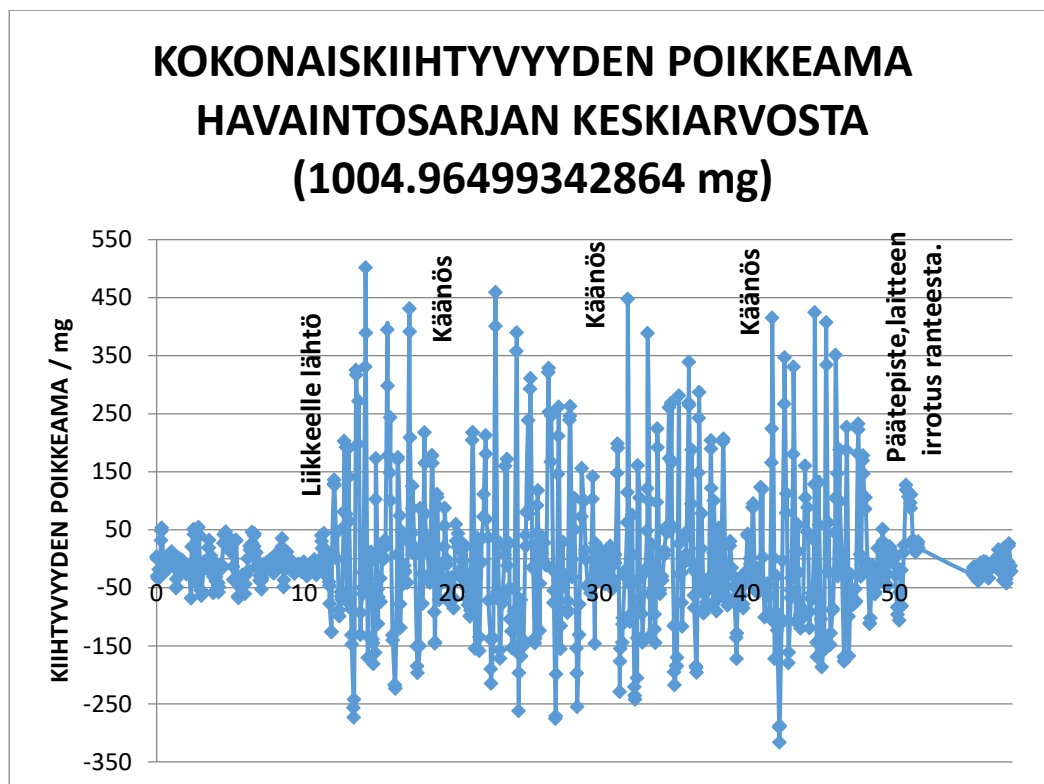
Kuva 9. SensorTile.boxin kävelyä ilmaisevia signaaleja.

Askeleiden laskentaa ajatellen kiihtyvyysanturin z-akseli magnetometrin x- ja y-akseli ja gyroskooppisensorin z-akseli ovat silmämääräisellä tarkastelulla selkeän luettavia (kuva 8, kuva 9). Käyrässä olevat ”piikit” korreloivat askelluksen kanssa. Lisäksi kulkusuunnan muuttumisen voi havaita kuvan 9 magnetometrin z-akselin suhteen (magZ_comp) varsin yksikäsitteisesti. Kuitenkaan tuo magZ_comp -käyrä ei ole voimakkaiden muutoskohtien ulkopuolellakaan mitenkään yksikäsitteisen suora. Käsi heiluu voimakkaasti ja rytmittää myös tätä akselia. Rytmisen liike näkyy helposti signaaleissa, jos ilmaiseva suunta on vähänkään suotuista.



Kuva 10. SensorTile.boxin magnetometrin itseisarvovektorin magnitudi ja magnetometrin ortogonaalisten akselien x ja y, sekä akselien z ja y muodostamien tasojen summavektoreiden kulmat.

Jos kaikkien magnetometriakselien data yhdistetään itseisarvoksi ($=\sqrt{\{x^2\}+\{y^2\}+\{z^2\}}$), häiriöttömässä ihannetilanteessa tuloksena pitäisi olla aina vakioarvoinen, samaan avaruuden suuntaan osoittava vektori. Magnetometrin itseisarvovektori (kuva 10) ei ole vakio mittauksen aikana, vaan mittausarvosta piirretyn käyrän perusteella arvo vaihtelee jonkin verran (n. 465 m gauss – n. 580 m gauss = 46,5 μT – 58 μT ; 1 gauss = 10^{-4}T). Mittaustulos vaihtelee vakioarvoisen maan magneettikentän voimakkuuden ympärillä (n. 55 μT). Jos häiriölähteitä ei tunneta, tämä vaihtelu vaikuttaa taatusti kompassin astelukemaan, jos sellaista seurataan. Näin ollen pelkästään tämä mittaus ei voi tuottaa luotettavaa kompassia. Kuva 10 kertoo, että kahteen kertaan kävelty sama viivasuora reitti tuottaa samankaltaisen muutoksen molemmilla kävelykerroilla magnetometrin vektorin itseisarvoon. Tämä viittaa ympäristöstä löytyvään paikalliseen häiriöön. Jos pyritään yhdistelemään magnetometrin tietoa tarkastelemalla mittaustulosta tasona, voidaan suuntaa arvailla vektorin kulman avulla. Kuvassa 10 on esitetty kaksi käyrää, (x - y -tasolle sekä z - y -tasolle). x - y -tason akselien summavektorin kulma ilmaisee hyvin askeleet. y - z -tason summavektorin kulma puolestaan havaitsee käännökset.



Kuva 11. SensorTile.boxin kiihtyvyysanturin datan itseisarvon poikkeama sarjan keskiarvosta.

Jotkut kiihtyvyysanturia käyttävät lähestymistavat [2] katsovat kiihtyvyysanturin mittausdatan poikkeavan niin vähän maan vetovoimasta, että liikkeen aiheuttamaa mittausarvojen vaihtelua voidaan pitää vain kohinaisena maan vetovoiman mittauksena. Lähempää tarkasteltuna (kuva 11) tätä lähestymistapaa voi pitää tässä työssä hivenen kyseenalaisena, jos halutaan selvittää vaikkapa henkilön liikkeellä olemista. Myös kiihtyvyysanturin kiinnityspiste (ranne) on lähellä käden ääripäätä. Jokin toinen vähemmän liikkuva kiinnityspiste voisi antaa erilaisen tuloksen (esimerkiksi selkä). Hetkelliset vaihtelut ovat voimakkaita suhteessa maan vetovoiman aiheuttamaan kiihtyvyyteen (noin -25% – $+45\%$). Askeleita käyrästä ei erotu yhtä terävästi, kuin useasta muusta mittausparametrasta. Jos mittaus halutaan nähdä kohinaisena mittaustuloksena maan vetovoimasta, täytyy dataa käsitellä ja keskiarvoistaa. Tässä käyrässä hetkelliset mittaustulokset eivät välttämättä johda hyvään lopputulokseen maan vetovoimavektorin määrittämisessä.

8. YHTEENVETO

Satelliittipaikannusta käytetään jo hyvin arkipäiväisenä apuvälineenä etenkin älypuhelimien sovelluksissa. Kuljetun reitin tallennus on hyvin tavallinen tapa hyödyntää satelliittipohjaisia navigointijärjestelmiä. Näin saadaan jälkikäteen hyvinkin tarkka kuva kuljetusta reitistä. Reitin varrelle voi helposti tulla katveja luonnollisten esteiden takia. Katveiden aikaisten kulkureitin seurannan voi kohtuullisella tarkkuudella korvata liikeantureiden antamien mittaustietojen avulla, kunhan järjestelmä on riittävän monipuolinen ja tietoa käsitellään matemaattisesti sensorifuusion periaatteella. Lopputulokseen vaikuttavat sovelluksen fyysinen kiinnityspiste henkilössä, liikeanturipohjaisen sovelluksen käyttämät eri sensoryypit, sensoreiden näytteistysnopeudet ja mittauksien dynaamiset alueet. Lisäksi on tutkittava ja päätettävä hyväksyttävän virheen suuruus ja vaikutus kokonaisuuteen. Valinnat voivat saada tehtävän tuntumaan joko vaikealta mutta mahdolliselta tai lähes mahdottomalta.

9. LÄHTEET

[1] Harle R. (2013) A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15, No 3, Third quarter 2013.

[2] Filippeschi A., Schmitz N., Miezal M., Bleser G., Ruffaldi E., Stricker D. (2017, luettu 6.2.2020) Survey of Motion Tracking Methods Based on Inertial Sensors: A Focus on Upper Limb Human Motion. Sensors 2017, 17(6), 1257. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/6/1257>.

[3] Poutanen M. (2016): Satelliittipaikannus, Tähtitieteellinen yhdistys Ursa ry, 349 s. ISBN 978-952-5985-41-2.

[4] Danchik R. J., Pryor L.L. (1984) The Navy Navigation Satellite System (Transit). Johns Hopkins APL Technical Digest, Volume 11, Numbers 1 and 2, 1990, s. 323-329. (luettu 17.4.2020) <https://www.jhuapl.edu/Content/techdigest/pdf/V11-N1-2/11-01-Danchik.pdf>

[5] Black H. D. (1981) Satellites for Earth Surveying and Ocean Navigating. Johns Hopkins APL Technical Digest, Volume 2, Number 1, 1981, s. 3-13. (luettu 17.4.2020) <https://www.jhuapl.edu/Content/techdigest/pdf/V02-N01/02-01-Black.pdf>

[6] GPS, The Global Positioning System (luettu 6.2.2020) URL: <https://www.gps.gov/>.

[7] IIAI Information And Analysis Center For Positioning, Navigation And Timing (luettu 6.2.2020). URL: <https://www.glonass-iac.ru/en/>.

[8] BeiDou Navigation Satellite System (luettu 6.2.2020). URL: <http://en.beidou.gov.cn/>.

[9] European GNSS Service Centre (luettu 6.2.2020). Galileo. URL: <https://www.gsc-europa.eu/galileo/european-gnss-service-centre>.

[10] VTT MIKES (luettu 6.2.2020). Aika ja taajuus. URL: <https://www.mikes.fi/kalibroinnit/aika-ja-taajuus>.

[11] ESA Navipedia (luettu 6.2.2020). Galileo Performances. URL: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Performances.

[12] Government of India, Department of Space (luettu 6.2.2020). U R Rao Satellite Centre, Bengaluru. URL: <https://www.ursc.gov.in/>.

[13] Federal Aviation Administration (luettu 6.2.2020). Satellite Navigation – WAAS – How It. https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas/howitworks/.

[14] Castañer L. (2016) Understanding MEMS: Principles and Applications. John Wiley & Sons Ltd, 336 s. ISBN 978–1–119–05542–6.

[15] Woodman O. J. (2007) An Introduction to Inertial Navigation. Technical Report Number 696, August 2007, University of Cambridge, Computer Laboratory. ISSN 1476–2986. URL: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.html>.

[16] Ilmatieteen laitos (luettu 6.2.2020). Eranto Suomessa. URL: <https://ilmatieteenlaitos.fi/eranto-suomessa>

[17] Nevanlinna H. (2009) Geomagnetismin ABC –Kirja. Raportteja 2009:1. Ilmatieteen laitos, Helsinki. URL: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/1204>.

[18] Ludwig S. A., Burnham K. D. (2018) Comparison of Euler Estimate Using Extended Kalman Filter, Madgwick and Mahony on Quadcopter Flight Data. In: 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 12–15 June 2018, Dallas, TX, USA. Electronic ISSN 2575–7296

[19] Särkkä S., Tolvanen V., Kannala J., Rahtu E. (2015) Adaptive Kalman Filtering and Smoothing for Gravitation Tracking in Mobile Systems. In: 2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 13–16 October 2015, Banff, Alberta, Canada.

[20] Renaudin V., Combettes C. (2014, luettu 6.2.2020) Magnetic, Acceleration Fields and Gyroscope Quaternion (MAGYQ)–Based Attitude Estimation with Smartphone Sensors for Indoor Pedestrian Navigation. Sensors 2014, 14, ISSN 1424–8220. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/14/12/22864>

[21] Noise analysis and identification in MEMS sensors, Allan, Time, Hadamard, Overlapping, Modified, Total variance (2016, luettu 6.2.2020). Design Tip DT0064. ST Microelectronics. URL: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/design_tip/group0/bf/92/6b/31/e7/c1/4d/c8/DM00311184/files/DM00311184.pdf/jcr:content/translations/en.DM00311184.pdf

[22] STEVAL-MKSBOX1V1 (luettu 6.2.2020). ST Microelectronics. URL: https://www.st.com/content/st_com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mems-motion-sensor-eval-boards/steval-mksbox1v1.html

[23] SensorTile.box wireless multi sensor development kit with user friendly app for IoT and wearable sensor applications. DB3903 (2019, luettu 6.2.2020). ST Microelectronics. URL: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data_brief/group2/9e/6e/a0/d7/7e/47/4c/4e/DM00615088/files/DM00615088.pdf/jcr:content/translations/en.DM00615088.pdf.